

불연속면의 통계적 모델링을 이용한 암반사면의 안정성 평가

조성우¹⁾ · 송재준^{2)*}

Analysis of Rock Slope using the Statistical Joint Modeling

Seong Woo Cho and Jae-Joon Song*

Abstract : This paper presents a numerical approach to evaluate the possibility of removable blocks on a rock slope by using statistical joint modeling and block theory. Block theory has been used to distinguish removable blocks from tapered or infinite blocks and analyze their stability. This theory, however, uses the information of joint orientation and therefore, can only predict the maximum area of removable block occurrence. In this study, rock joints were statistically modeled: Probability distribution functions of the joint orientation and size, and volumetric frequency were estimated from window sampling data. Rock blocks consisting of a slope face and the modeled joints were simulated and their removability was tested. The entire analysis process was coded into a computer program, and each algorithm of the entire process was verified by comparing its result with theoretic solutions. In many cases, slope collapse is triggered by an excessive hydraulic pressure due to an intensive and/or continuous rainfall in the monsoon season. This kind of collapse shows that water saturation of discontinuities in the slope lowers the rock block safety of the slope. We also, therefore, tested the groundwater effect on slope stability.

Key words : Block theory, Rock slope, Slope stability, Statistical joint modeling, Vector analysis

요 약 : 암반사면의 거동가능블록은 사면과 암반내부에 존재하는 절리들의 교차로 인하여 생성되며 이로 인해 발생한 낙석은 인명과 재산에 큰 피해를 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 통계적 절리 모델링 기법과 블록 이론을 이용하여 이러한 거동가능한 암반블록의 발생가능성을 알아보는 연구를 수행하였다. 블록이론은 이러한 거동가능 블록을 알아보는데 매우 간편한 해를 제공하나 지나치게 변수를 단순화하기 때문에 최대 발생가능한 블록의 크기만을 산정하는데 그 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 조사된 샘플을 이용하여 절리의 방향성, 크기, 밀도의 추정치를 구하고 사면과 절리(불연속면)를 통계적으로 모델링하였으며, 블록이론을 응용하여 암석블록의 안정성을 해석하는 컴퓨터 프로그램으로 개발하였다. 많은 경우에 암반사면의 붕괴는 장마나 집중호우 시에 발생함을 볼 때 수압이 사면의 붕괴에 큰 영향을 끼침을 알수 있는데, 이러한 경우를 고려하기 위하여 본 연구에서는 지하수의 영향 또한 연구하였다.

주요어 : 블록이론, 암반사면, 안정성 해석, 통계적 절리 모델링, 벡터해석법

서 론

노천광산에서는 광산개발이 진행됨에 따라 다양한 방향의 암반사면이 점차 심도와 깊이를 더해가게 되고 이에 비례하여 사면에는 낙반가능한 암석블록의 발생빈도가 증가하게 된다. 암반 사면에서는 작은 부피의 블록이

라고 할지라도 암석의 높은 비중으로 인하여 사면에서 분리될 경우 인명이나 재산에 심각한 손상을 줄 수 있으므로 암반 사면을 절취하는 과정은 물론 사후 관리에도 지속적으로 관심을 기울여야 한다. 이를 방지하기 위해서 많은 사면보호공법이 존재하나 실제 발생가능한 암반블록의 크기나 개수 등에 대한 구체적인 조사가 이루어지지 않고 그 공법이 결정되는 경우가 많다. 적절한 공법의 적용을 위해서는 암석블록의 발생양상과 발생가능성에 대한 정량적인 조사분석이 필수적이다.

Goodman & Shi(1985)등에 의해서 제안된 블록이론은 사면에 존재하는 절리면과 자유면으로 형성된 암반블록의 안정성을 판단하는데 중심을 둔 해석 이론이다. 이 이론은 절리의 방향과 마찰각 및 점착력 정보를 이

2006년 9월 26일 접수, 2006년 10월 26일 채택

1) 대림산업(주)

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

*Corresponding Author(송재준)

E-mail: songjj@snu.ac.kr

Address: School of Civil, Urban and Geosystem Eng.
Seoul National University San 56-1, Shilim-Dong,
Kwanak-Gu, Seoul 151-742, Korea

용하여 암반 블록을 판별하고 그 거동을 예측할 수 있으며 무엇보다 비교적 신속하게 해석 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 절리 정보를 지나치게 단순화시켜 실제 발생하는 암반 블록의 크기와 빈도 등을 산정하기 어렵다는 단점도 가지고 있다. 본 연구에서는 블록이론을 비롯한 블록 안정성 해석에 관한 기존의 연구를 기반으로 하여 다음과 같이 암반 사면의 안정성을 해석하는 방법을 개발하였다.

먼저, 통계적 절리 모델링 기법을 사용하여 암반 사면에 실제로 발생 가능한 블록을 수치적으로 묘사하였다. 이는 조사창 조사를 통해 얻은 통계적 정보를 모의시험을 통해 암반 사면에서 실제 발생 가능한 절리면을 반복적으로 발생시킴으로써 가능하다. 다음으로 암반 내에 존재하는 지하수의 영향을 고려하였다. 사면은 특히 폭우나 장마 기간에 붕괴하는 비율이 매우 높는데 이는 지하수로 인하여 암반 내부에 수압이 발생, 절리면의 유효응력이 감소함으로써 전단파괴가 쉽게 일어나기 때문이다. 마지막으로 개별 블록들의 안정성 해석을 바탕으로 사면에 대한 총체적인 평가를 내릴 수 있는 방법에 대해서 연구하였다. 이를 위해서 거동가능블록을 이용하여 암반사면의 안정성을 평가하는 새로운 방법을 제안하였다. 이와 같은 해석과정을 자동화 하기 위하여 암반사면 블록의 안정성 해석 프로그램을 개발하였다.

배경 이론 및 프로그램 해석 알고리즘

본 연구의 해석에서는 먼저 3차원 공간상에 불연속면을 발생시키고 생성된 불연속면의 기하학적인 위치를 판단하여 블록을 판별하게 된다. 여기서 판별된 모든 블록에 대하여 최종적으로 각 개별 블록의 거동성을 확인하고 안전율을 평가한다. 이를 수행하기 위한 해석 알고리즘은 Fig. 1과 같다.

통계적 절리 모델링

절리의 방향과 크기는 암반내부의 절리의 모습을 추정하는데 가장 중요한 요소이다. Mauldon(1998)은 절리를 디스크 형태로 가정하고 절리방향과 절리반경에 대한 표준편차 등의 통계값을 사용하여 발생하는 적절한 암반블록의 크기를 산정하였고, Priest & Hudson(1981)는 조사선 조사를 통한 절리의 형태를 산정하는 식을 제시하였다.

본 연구에서는 절리의 방향분포를 나타내기 위해서 투영구 상에서 절리균이 특정 방향을 중심으로 원형의 밀집 형태를 띠는 Fisher(1953) 분포를 사용하여 절리균에 속하는 임의의 한 점이 중심 방향과 θ 에서 $\theta + d\theta$ 의 각을 이룰 확률 $P(\theta)$ 를 이용하여 확률밀도함수 $f(\theta)$ 를 작성

하고 절리를 발생시켜 사용하였다.

송재준(2005)은 최소자승법을 이용하여 오차와 편향을 최소화하는 직경분포의 추정법을 개발하였는데, 이 추정 방법은 현장에서 조사한 양끝내포선(contained trace)의 분포로부터 직접적으로 절리의 직경분포를 구하며, 이 과정에서 체적빈도도 같이 제공한다.

높이가 H이고 폭이 W인 직사각형 조사창에서 길이가 l인 양끝내포선의 중심점 존재가능 영역의 넓이를 계산하고, 다음으로는 절리원판의 직경을 고정시키고 이 원판의 중심이 이동하면서 양끝내포선을 만드는 경우에 대하여 관계식을 유도하면 조사창에서 관찰되는 길이가 l인 양끝내포선의 평균 개수(N_l^c)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N_l^c = 2A_l^c \sin \phi \cdot \lambda_V \int_l^{S_{\max}} c(s) dt ds \quad (1)$$

여기에서 절리원판 중심점의 체적빈도는 λ_V 이고 원판의 직경분포는 $c(s)$ 이다. 실제 현장 자료를 사용할 경우 절리선 길이분포는 히스토그램과 같이 이산 자료로 나타나므로 식 (1)을 이산분포로 나타내면 다음과 같다.

$$N_l^c = A_l^c \sin \phi \cdot \lambda_V \sum_{j=i}^n [(\sqrt{j^2 - (i-1)^2} - \sqrt{j^2 - i^2}) \cdot c_j] \quad (2)$$

식 (2)의 이론적 절리갯수와 현장조사를 통해 얻은 절

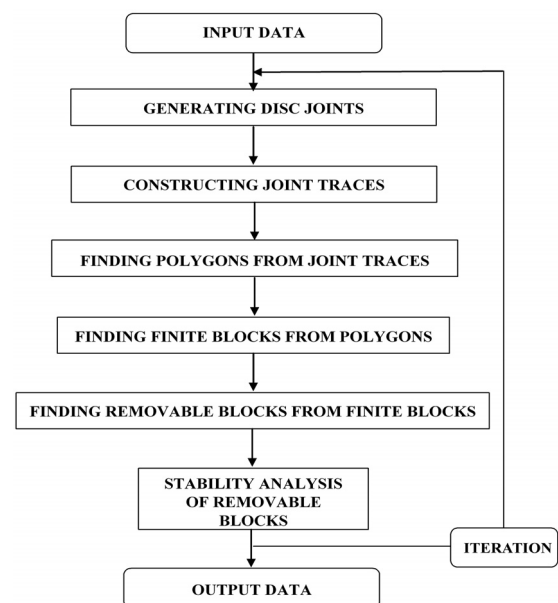


Fig. 1. Flowchart of the program algorithm.

리갯수의 차에 최소자승법을 적용하여 직경분포 c_j 와 체적빈도 λ_v 를 구하게 된다.

앞선 과정을 통하여 절리의 방향, 크기, 빈도 등에 대한 확률분포와 변수를 구하면 이를 통해서 3차원 공간상에 포아송 디스크를 발생시킬 수 있다. Fig. 2는 층리와 단층을 나타내는 고정 불연속면과 통계적 모델링으로 발생시킨 개별 절리를 보여주고 있다.

절리망 구성 및 블록의 판별

고정된 불연속면과 통계적 모델링을 통해 생성된 절리는 암반사면에 절리망을 구성하게 되는데 절리망의 기하

학적인 구성은 평면과 절리원판의 교점 계산을 기초로 하여 구하게 된다. 절리망은 2차원 평면상에 절리선을 나타내는 선분으로 나타나며 이를 이용하여 사면에 나타나는 후보 블록들을 구하게 된다.

Jing & Stephansson(1994)이 제시한 평면상에서의 다각형 선별법은 Fig. 3과 같다. 그 과정은 다음과 같이 4 단계로 구분된다.

먼저 사면의 경계와 절리선의 양끝단을 조사하여 모든 정보를 선분으로 구성한다. 다음으로 모든 선분들간의 교점을 조사하고 쓸모없는 선분들을 제거한 후, 각 이웃한 교점끼리 2개의 양방향 벡터를 구성한다. 폐다각형을

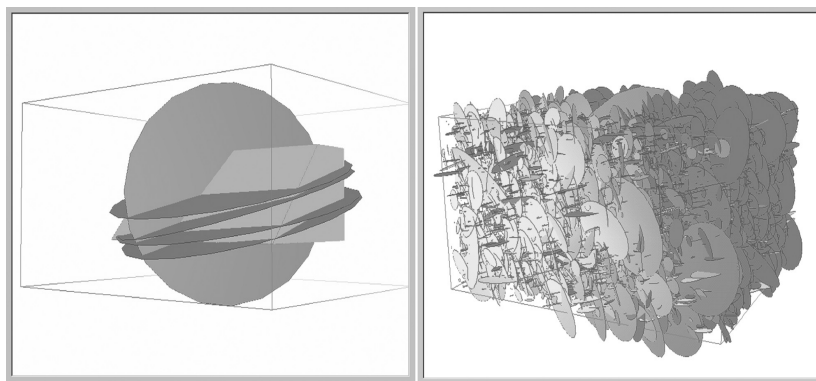


Fig. 2. View of generated bedding planes and 3 joint sets.

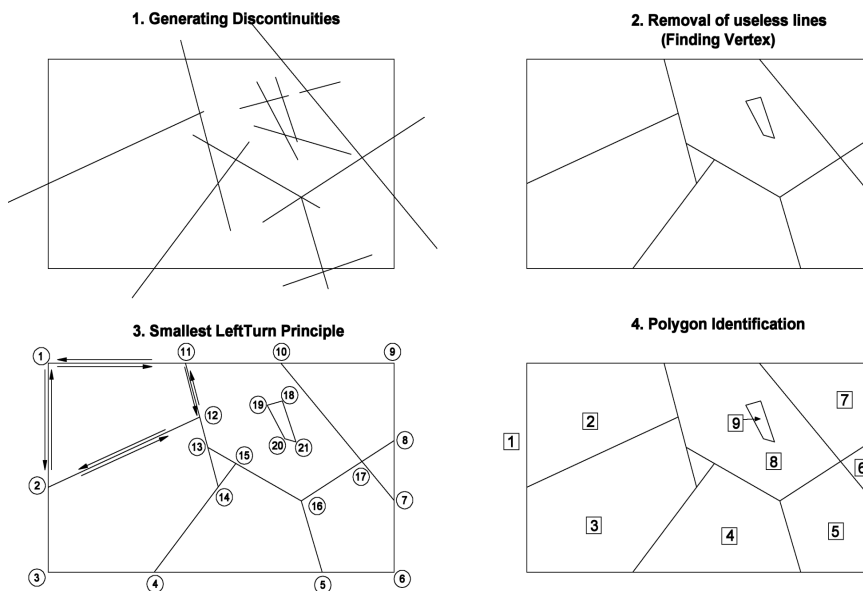


Fig. 3. Process of finding closed polygons (after Jing & Stephansson, 1994).

찾기 위해서는 임의의 한 점에서 출발하여 다음 교점까지 진행하고 반시계 방향으로 가장 작은 각을 가지는 방향의 선분으로 진행(smallest left turn principle)하고, 한번 지나간 선분의 진행방향 벡터는 반복 통과를 방지하기 위해 메모리에 기록해 둔다. 이러한 원칙에 의하여 진행하다가 출발점으로 다시 돌아왔을 경우 하나의 블록을 찾은 것으로 기록하며, 계속해서 다음 블록을 찾게 된다. 모든 벡터를 다 사용했을 때 판별과정은 종료된다.

블록 이론에 따른 블록의 판별 및 안전율 계산

Goodman & Shi(1985)에 의해서 제안된 이론인 블록 이론은 현장암반을 불연속면들에 의해 발생하는 암석블록의 집합체로 보고 여기서 발생할 수 있는 블록의 종류 및 거동양상을 판별하는 이론이다. 블록의 거동양상은 암석블록의 경계부를 구성하는 자유면과 불연속면들의 상대적인 위치와 방향, 그리고 블록에 작용하는 힘의 방향과 크기에 따라서 결정된다.

블록의 구분은 먼저 유한성과 무한성에 따라 분류하는데 암반 내에서 불연속면과 자유면에 의해 경계가 설정되어 일정한 부피를 가지는 다면체를 유한블록(finite block)이라고 하며, 불연속면에 의해서 폐합되지 못하고 특정방향으로 무한한 연장성을 가지는 블록을 무한블록(infinite block)이라고 한다. 유한블록은 다시 거동불가능블록(tapered block)과 거동가능블록(removable block)으로 나누어진다. 여기에서 거동불가능블록은 기하학적인 구조로 인하여 암반 내에 블록이 갇혀서 이동이 불가능한 블록이다. 거동가능블록은 다시 안정블록(stable block)과 잠재적 키블록(potential key block), 그리고 키블록(key block)으로 구분할 수 있다. 안정블록은 블록에 작용하는 힘의 방향 특성상 자유면의 저항력이 없는 최악의 경우에도 블록의 이동이 발생하지 않는 블록인 반면에 잠재적 키블록은 합력이 블록의 거동을 가능하게 하는 방향으로 작용하나 마찰력 등에 의해서 블록의 이동이 일어나지 않는 블록을 의미한다. 키블록은 마찰 등에 의한 저항력보다 거동력이 커서 자유면 발생과 동시에 움직이게 되는 블록이다.

거동가능블록으로 판별된 블록에 대해서는 파괴종류를 결정하고 이에 대한 안전율을 계산한다. 본 연구에서는 Warbutron(1981)이 제안한 벡터 안정성 해석법(Vector Stability Analysis)을 사용하여 각 블록의 안정성을 해석하였다. 이 해석법은 블록을 구성하는 각 절리면의 방향 벡터, 블록의 질량중심에 작용하는 합력, 거동방향의 단위벡터를 이용하여 거동성을 해석한다. 거동가능 블록의 파괴형태는 3가지로 나눌 수 있는데 먼저 블록이 아무런 지지면 없이 움직이는 경우로 자유낙하나 지하수등의 부

력으로 인하여 뜨는 경우가 여기에 속한다. 다음으로는 한 면을 지지면으로 평행하게 움직이는 경우(평면파괴)와 두 면을 지지면으로 하여 썩기파괴가 발생하는 경우가 있다. 각각의 파괴는 사면의 방향벡터와 블록을 구성하는 절리면의 방향벡터를 이용하여 결정한다.

사면을 설계할 때에는 가능한 한 안전율의 범위를 충족적으로 다루고 지하수 상태의 변화에 대한 사면의 민감도를 고려하여야 한다. Fig. 4는 블록에 작용하는 합력의 방향에 따른 성분을 나타내고 있다. 블록의 하중으로 인한 합력 W 는 사면 쪽으로 향하는 분력인 거동력 f 와 이에 수직한 분력 n 으로 분해된다. 이 힘들과 점착력 c , 그리고 사면내 지하수로 인한 부양력 U 를 이용하여 블록의 안전계수를 산정하게 된다. 안전계수는 식(3)과 같이 미끄러짐을 유발시키는 힘에 대한 미끄러짐에 저항하는 힘의 비로 주어진다.

$$F_{dry} = \frac{cA + n \cdot \tan \phi}{W \sin \phi}$$

$$F_{saturated} = \frac{cA + (n - U \sin \theta) \cdot \tan \phi}{W \sin \phi + U \cos \theta} = \frac{cA + (n - U_n) \cdot \tan \phi}{W \sin \phi + U_f} \quad (3)$$

여기에서 ϕ 는 미끄러짐면(지지면)의 마찰각이고 θ 는 합력 U 가 미끄러지는 면과 이루는 각이 된다. 또한 c 는 미끄러지는 면의 점착력, A 는 미끄러지는 면의 면적이다.

여기에서 수압은 식 (4)로 계산될 수 있다.

$$U_1 = \frac{1}{2} \gamma_w z_2 z_1 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \psi_{p1} \right)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} \gamma_w z_2^2 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \psi_{p2} \right)$$

여기에서 ψ_{p1} , ψ_{p2} 는 각각 1번과 2번 절리면이 경사각이다.

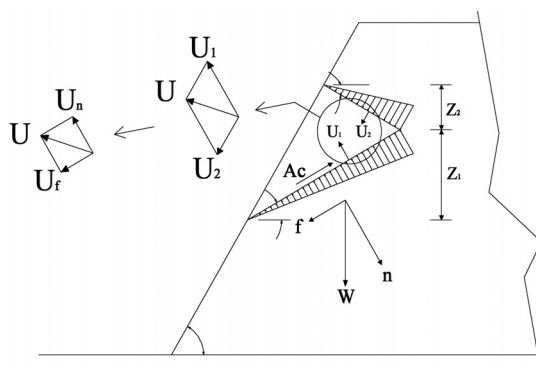


Fig. 4. Ground water pressure in plane failure (after Wyllie, Duncan & Mah, 2004).

사면 평가

사면의 안정성을 평가하는 기법은 여러 연구자를 통해 다양한 해법이 제시되어 왔다. 이러한 해법들을 해석대상의 규모에 따라 분류하면 개별 블록 또는 사면의 파괴 유형별 안정성 해석과 사면전체에 대한 안정성 해석의 두 가지로 구분할 수 있다. 전자의 경우 사면에 대한 육안관찰(Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996) 또는 평사투영도나 한계평형법을 적용하여 파괴 유형을 분석한(Hoek and Bray, 1981) 후 파괴 유형별로 안전율과 부피 등을 계산하여 안정성 평가를 하는 반면, 후자에서는 사면에 존재하는 불연속면과 암석의 강도, 강수량, 각 블록의 안정성 해석자료 등을 총괄적으로 고려하여 사면전체의 안정성을 평가하는 방법이다. 후자의 경우에서 널리 알려진 방법 중의 하나로 SMR(Romana, 1985 & 1993)이 있다. SMR은 암반분류법인 RMR(Bieniawski, 1973 & 1979)의 평가점수를 기본으로 하여 사면과 절리의 경사방향과 경사, 사면의 절취방법을 고려하여 사면의 안정성을 하나의 수치로 표현하는 방법이다. 한편, 후자에 속하는 국내의 연구로는 윤운상(2003)에 의하여 제시된 SFi system이 있다. SFi system은 사면을 토층의 깊이와 사면에 존재하는 블록의 크기에 따라 절리암반, 파쇄암반, 괴상 연(경)암반, 토상지반으로 나누고 사면의 각 유형별로 사면과 절리면의 방향과 절리면 전단강도, 간격과 길이, 암석의 강도 또는 토질 조건, 토층 심도, 사면의 경사 및 높이 등을 고려하여 사면 안정성을 점수화한다. 또한 여기에 기후와 지진, 절취 및 보강 방법에 따라 점수를 보정한 뒤 최종 평가치를 얻는다. 상기 SRM과 SFi system 모두 사면에 존재하는 불연속면과 암석의 특성을 입력자료로 하여 기본 점수를 얻고 여기에 외부적/인위적 요인을 보정요소로 한다는 점에서 공통점이 있다. 사면전체에 대한 안정성 해석 방법 중 각 블록의 안정성을 고려한 방법으로는 Feng and Lajtai(1998)의 통계적 해석법이 있다. 이들의 연구에서는 평면/썰기 파괴 가능성이 있는 전체 거동가능블록 중에서 실제로 파괴가 발생한 블록의 확률을 계산하여 이를 사면의 안정성 평가지수로 활용하였다. 또한 파괴유형별로 각 블록의 안전율변화를 누적확률분포로 나타내어 보다 세부적인 평가가 이루어지도록 하였다.

이 연구에서는 통계적 절리모델링을 통하여 발생한 개별 블록들의 안전율 및 규모에 대한 상세한 정보를 이용하여 사면전체의 안전율을 보다 간단하게 표현하는 지수를 제안하고자 안전지수 SI_1 과 SI_2 를 식 (5)와 식 (6)와 같이 정의하였다. 식 (6)이 전체 사면에서 위험블록의 절대적인 양을 표현하는 식이라고 하면, 식 (5)는 이러한 위험블록들의 개별적인 안정성을 고려하여 위험블록들

의 안정성을 평가하는 식이 된다.

$$SI_1 = \frac{\sum_{i=1}^N FS_i \times Volume_{i, key Block \& Potential Key Block}}{\sum_{i=1}^N Volume_{i, key Block \& Potential Key Block}} \quad (5)$$

$$SI_2 = \frac{\sum_{i=1}^M Volume_{i, Key Block}}{AREA_{slope}} \times 100 \quad (6)$$

여기에서 N 은 키블록과 잠재적 키블록 개수의 합이며 M 은 키블록의 개수를 의미한다.

SI_1 은 키블록과 잠재적 키블록의 안전율을 그 부피비를 이용하여 가중평균한 값으로서 사면 전체의 블록발생에 대한 안전율을 가리킨다. 반면에 SI_2 는 사면의 면적으로 키블록의 부피합을 나눈 것으로서 사면의 단위 면적당 발생하는 키블록의 평균 부피를 가리킨다. 결국 SI_1 은 해당 사면에 발생하는 위험블록의 평균 안전율을, SI_2 는 위험블록의 규모를 나타내는 것으로 이 낮을수록, 또한 이 높을수록 전체적인 암반사면은 불안정하다고 평가할 수 있다. Feng and Lajtai(1998)의 방법에서는 사면의 안정성을 위험블록의 비율 또는 안전율 변화로만 표현한 것에 반해 이 연구에서는 위험 블록의 규모도 함께 고려하였다는 점에서 구별된다고 할 수 있다.

암반사면에의 현장 적용

현장 조건

해석 대상 부지는 전남 광양에 위치한 대규모 암반 사면이다. 대상 사면에서 보이는 지배적인 선구조는 다음의 Fig. 5에 나타나 있다. 여기에는 저경사의 층리들이 조밀하게 발달되어 있으며 사면의 중심을 사선으로 가



Fig. 5. Site view.

로 지르는 단층대로 인하여 인근에 많은 블록이 형성됨을 관찰할 수 있다.

절리 모델링

현장에서 조사창 조사를 통해 이루어진 자료를 토대로 절리군 분석을 시행하여 그 방향성을 분석하였으며, 2.1 절에서 소개한 방법에 따라 체적밀도와 직경분포를 추정하였다.

해석과정 및 결과

현장 사면의 안정성 해석은 본 연구에서 개발한 프로그램 통하여 이루어졌다. 반복적인 절리 발생 및 블록 안정성 해석을 통하여 사면의 안정성을 평가하게 되는데 해당 현장은 고정 불연속면이 비교적 큰 규모로 존재하고 절리의 체적밀도가 높아서 5회 이상 반복시험 후 해석결과가 빠르게 수렴하는 것을 관찰할 수 있었다.

조사 대상 사면의 가로 40m, 세로 20m에 해당하는 지역에 50회 반복 해석을 실시하였다. 해석은 각각 현재의 건조한 상태와 집중 호우나 장마로 인하여 완전 포화된 2가지의 경우에 대해서 실시하였다. 또한 안정성에 크게 영향을 끼치지 않는 10cm³ 이하의 블록은 결과에서 제외하였다. 해석 결과는 Table 2와 같다.

상기 조사 대상 사면에서는 현장에서 육안으로도 많은 거동가능블록들을 관찰할 수 있었다. 해석 결과에서는 각 대상사면(40m X 20m)에서 평균적으로 166개의 키

블록이 발생하며 이들의 평균적인 크기는 0.088m³에 이르렀는데 이 크기는 한변이 대략 44cm인 정육면체의 암석블록의 부피와 같다. 또한 키 블록의 평균 심도가 깊은 것으로 나타나므로 이는 록볼트 등을 이용해서 보강을 할 경우에 이 해석결과를 참조하여 충분한 깊이까지 시공을 하여야 함을 알 수 있다. 본 해석을 통하여 해당 사면은 강우시에 더욱더 큰 피해가 발생할 수 있음을 확인하였다. 암반 내 수압의 영향으로 블록의 개수가 25%이상 더 발생할 뿐만 아니라 키블록의 크기와 심도 또한 더욱 크게 증가하였다.

해석 대상은 절취공사가 이미 어느 정도 진행된 된 암반 사면이기 때문에 건조한 상태에서 키블록으로 판별된 블록들은 절취 공사중에도 상당량 파괴가 이루어 졌을 가능성이 높다. 특히 현장에서 조사창 조사를 진행하는 동안에도 실제로 작은 외력으로도 쉽게 이동(파괴)하는 암석 블록이 많은 것을 볼 때 사면이 수압의 영향을 받는다면 실제로 파괴되는 블록이 더욱 많을 것으로 판단된다. 즉, 해당 사면의 해석 단위 면적(40m X 20m)에서 건조시와 포화시의 거동가능블록 발생량의 차이인 14m³의 암석 블록이 차후에 파괴될 가능성이 있으므로 이에 대한 보강이 필요한 것으로 판단된다. 다음 Fig. 7 ~ Fig. 10은 상기 해석 결과를 보여준다. 이 그림들에서 짙은색으로 표현된 부분은 블록발생확률이 높은 것을 나타낸다.

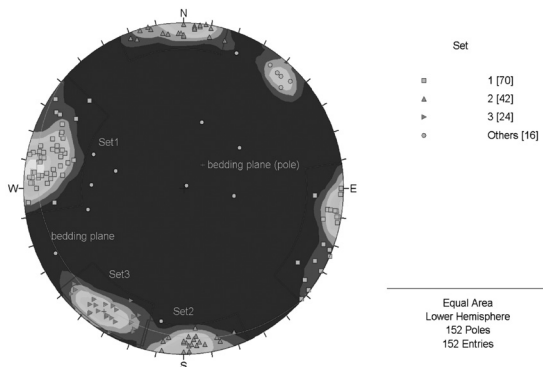


Fig. 6. Stereographic projection of investigated joints.

Table 1. Orientation data of 3 joint sets

Set No	Dip direction / Dip	Fisher K	Volumetric Frequency(m ⁻³)
1	103 / 83	27	0.962
2	358 / 89	52	0.455
3	34 / 78	64	0.710

Table 2. Result of slope analysis after 50 iterations

Factor	Dry slope	Saturated slope
Volume of potential key + key blocks	33.967	34.560
Key block volume	14.450	28.676
Slope Index 1	5.447	1.590
Slope Index 2	1.445	2.868
No. of finite blocks	1098 EA	1062 EA
Mean volume of finite blocks	0.120	0.117
Mean depth of finite blocks	1.001	1.025
No. of potential key + key blocks	570 EA	550 EA
Mean volume of potential key + key blocks	0.060	0.063
Mean depth of potential key + key blocks	166 EA	208 EA
No. of key blocks	166 EA	208 EA
Mean volume of key blocks	0.088	0.138
Mean depth of key blocks	0.966	1.470

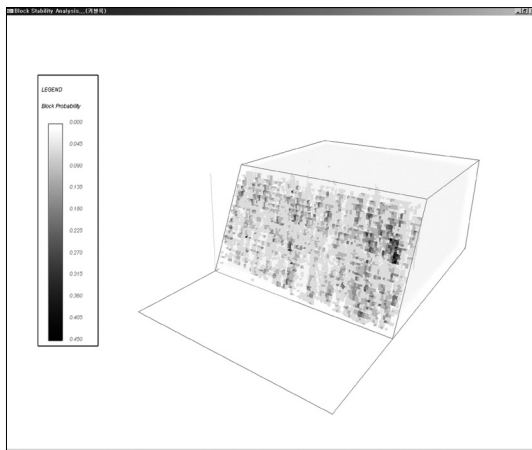


Fig. 7. Distribution of key block volume in dry slope.

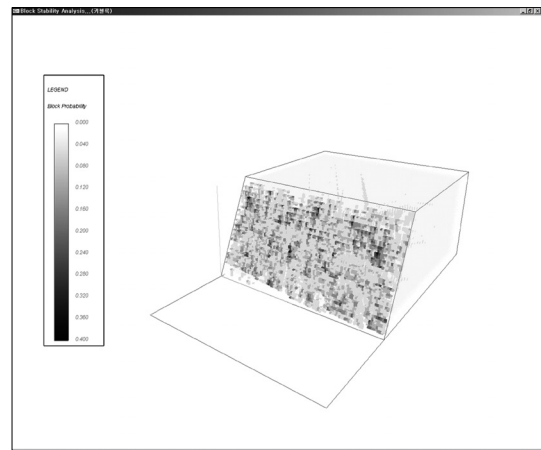


Fig. 8. Distribution of key block volume in saturated slope.

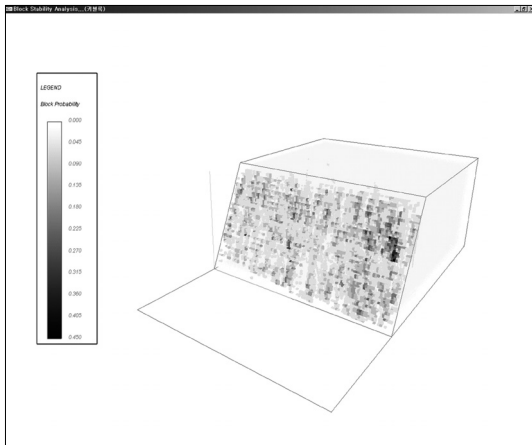


Fig. 9. Distribution of key block depth in dry slope.

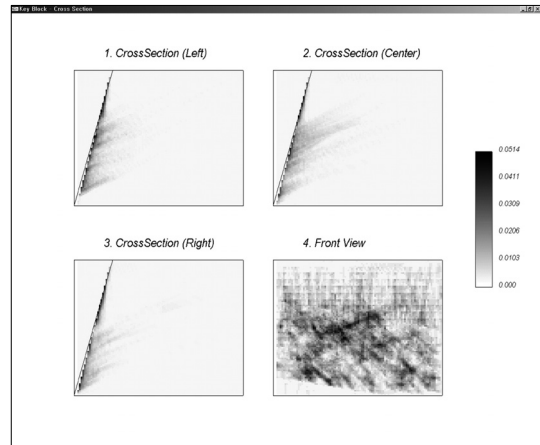


Fig. 10. Distribution of key block depth in saturated slope.

결론

본 연구에서는 암반 사면에 발생하는 블록의 특성 및 거동성을 해석하기 위해서 조사창 조사를 통한 절리 자료를 이용하여 통계적 절리를 발생시키고 여기에서 생성되는 블록의 거동형태 및 안정성을 평가하는 방법을 연구하였다. 그 결과 기존의 블록이론을 통한 키블록 해석법에 비해 실제 현장에서 발생 가능한 블록의 위치와 크기 분포를 얻을 수 있었고 각 블록의 거동 및 안정성을 해석할 수 있었다. 본 연구를 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 개발한 프로그램의 모든 알고리즘은 일정한 유한 블록을 대상으로 하여 각 과정에 대한 검증을 실시하여 프로그램의 신뢰성을 확인하였으며, 테이퍼

드 블록, 안정블록, 잠재적 키블록, 그리고 키블록에 대한 발생 위치, 부피, 최대 심도, 안전계수등에 대한 자료를 출력하여 암반 사면에 대한 각 블록의 해석 결과를 표현하였다.

2. 블록의 안정성을 해석함에 있어서 지하수에 의한 수압의 효과를 고려하였다. 그 결과 각각 개별블록의 안정성은 지하수의 영향을 크게 받을 수 있었으며 전체 사면에 대한 영향을 도출할 수 있었다.

3. 반복 해석을 통해 구한 개별 블록의 안정성을 이용하여 사면 전체에 대한 안전계수를 산출할 수 있는 새로운 지수를 제안하였다. 이는 개별 블록의 안정성에 대해서 블록의 부피를 가중치로 적용하여 위험정도에 대한 평가를 내리는 요소와 또한 사면 전체에서 키블록의 부피를 산출하여 단위 면적의 사면에서 발생하는 위험 블

록의 규모에 대한 평가를 내릴 수 있도록 하였다. 이 지수들은 앞으로 다수의 현장적용을 통해 유용성에 대한 검증 및 보완이 이루어져야 할 것이다.

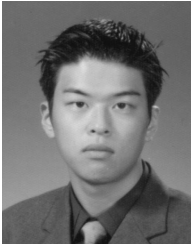
4. 개발된 프로그램을 사용하여 실제 현장에 적용하였다. 해석 결과 키블록은 층리와 단층의 고정 불연속면을 중심으로 많이 발생하였다. 이는 실제 사면의 상황과 일치하는 결과인데 실제 현장에서도 저경사 층리와 급경사 단층이 만나는 곳에서 많은 붕괴가 이루어졌다. 또 발생하는 블록의 크기를 살펴보면 평균적으로 0.088m^3 의 부피와 0.966m 의 심도를 가지는 키블록이 166개 가량 발생하는 것으로 조사되었다. 부피 분포를 살펴보면 실제적으로는 이보다 작은 0.018m^3 의 블록이 표면에서 집중적으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 지하수의 영향을 고려하여 사면 해석을 시행한 결과 포화된 경우에 해석 사면은 매우 불안정한 것으로 판단된다. 특히 발생한 키블록의 부피가 14.45m^3 에서 28.67m^3 으로 증가하였고 본 연구에서 제한한 지수를 통해서 비교한 결과 포화 사면에서 안정성은 1/3가량 감소하였으며, 위험정도는 2배 가량 증가하였다.

사 사

이 연구는 행정자치부 소방방재청 국책연구개발사업인 자연재해방재기술개발사업 (과제번호: M10324010003-04L0601-00310)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 송재준, 2005, “최소자승법을 이용한 원판형 절리의 직경 분포와 체적빈도 추정에 관한 연구”, *터널과 지하공간, 한국암반공학회지*, 제15권 2호, pp.137-144
- 윤은상, 2003, 단열구조분포 특성화와 사면 안정성 해석 연구, 이학박사 학위논문, 서울대학교 대학원, 서울.
- 조성우, 2005, 통계적 절리모델링을 통한 암반사면 블록의 거동성 해석, 공학석사 학위논문, 서울대학교 대학원, 서울.
- Bieniawski, Z.T., 1973, “Rock mass classification in rock engineering”, *Proc. of Symp. on Exploration for rock engineering*, pp. 97-106.
- Bieniawski, Z.T., 1979, “The geomechanics classification in rock engineering application”, *Proc. of 4th ISRM Congress*, Montreux, pp. 51-58.
- Cruden, D.M. and Varnes, D.J., 1996, “Landslide types and processes”, *Special Report 247: Landslides - investigation and mitigation*, Washington, D.C., TRB, National Research Council, Chapter 3.
- Hoek, E. and Bray, J., 1981, *Rock Slope Engineering* (3rd eds.), Inst. Of Mining and Metallurgy, London.
- Feng, P., and Lajtai, E.Z., 1998, “Probabilistic treatment of the sliding wedge with EZSlide”, *Engineering Geology*, Vol. 50, pp.153-163.
- Fisher, R. A., 1953, “Dispersions on a sphere”, *Proc. Of Royal Society London A217*, pp.295-305
- Goodman, R. E. and Shi, G. H., 1985, *Block theory and its application to rock engineering*, Prentice-Hall Inc.
- Jing, L. and Stephansson, O., 1994, “Topological identification of block assemblages for jointed rock masses”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 31, No. 2, pp. 163-172.
- Mauldon, M., 1998, “Estimation mean fracture trace length and density from observations in convex windows”, *Rock Mechanics and Rock engineering*, vol.31(4), pp.201-216
- Romana, M., 1985, “New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes”, *Proc. Int. Symp. on the role of rock mechanics*, pp.49-53.
- Romana, M., 1993, “A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating”, *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, pp. 575-599.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, “Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys”, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.18, pp.183-197.
- Song, J.J. and Lee, C.I., 2001, “Estimation of joint length distribution using window sampling”, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 38, pp. 519-528.
- Varnes, D.J., 1978, “Slope movement types and processes”, *Special Report 176: Analysis and Control: Landslide*, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 11-33.
- Warburton, P. M., 1981, “Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 18, pp. 415-427.
- Wyllie, Duncan C. and Mah Christopher W., 2004, *Rock Slope Engineering civil and mining*, 4th edition, Spon Press Inc.



조 성 우

2000년 서울대학교 지구환경시스템공학부
학사
2006년 서울대학교 지구환경시스템공학부
석사

현재 대림산업(주) 사원
(E-mail; ustormbringer@gmail.com)



송 재 준

1993년 서울대학교 자원공학과 학사
1995년 서울대학교 자원공학과 석사
2000년 서울대학교 자원공학과 암석역
학전공 박사

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
(E-mail; songjj@snu.ac.kr)
